

# Medida de la distribución de temperatura en un transformador mediante Raman distribuido en fibra óptica

## Distributed temperature measurement in electrical transformer with Raman in optical fiber

Massimo L. FILOGRANO<sup>(1)</sup>, Miguel GONZÁLEZ-HERRÁEZ<sup>(1)</sup>, Pedro CORREDERA<sup>(2)</sup>, Sonia MARTIN LOPEZ<sup>(2)</sup>, Oscar ESTEBAN<sup>(1)</sup>, María Luisa HERNANZ SANJUAN<sup>(2)</sup>, Félix RODRÍGUEZ BARRIOS<sup>(2)</sup>, Pablo CIRUJANO-BALLESTEROS<sup>(3)</sup>, Luis FLORES<sup>(3)</sup>, Fernando GARNACHO<sup>(4)</sup> y Miguel Angel SANCHEZ-URÁN<sup>(4)</sup>

1. Grupo de Ingeniería Fotónica, Departamento de Electrónica, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Alcalá, Campus Universitario s/n, 28871 Alcalá de Henares, Madrid.
2. Departamento de Metrología, Instituto de Física Aplicada, CSIC, Serrano 144, 28006 Madrid
3. COTRADIS-ORMAZABAL, Pol. Ind. El Caballo, Parcela 56, 28890 LOECHES (Madrid)
4. Fundación para el Fomento de la Innovación Industrial (FFII), José Abascal, 2, 28006 Madrid.

Persona de contacto: Pedro CORREDERA (pcorredera@ifa.cetef.csic.es).

### RESUMEN:

Se presenta una evaluación de la técnica de OTDR Raman en fibra óptica multimodo para la monitorización de la distribución de temperatura en el interior de un transformador de media tensión. El objetivo final es el estudio la generación de puntos calientes en el interior del transformador como posibles causas de la generación de descargas parciales responsables del deterioro e incendio de éstos. Se utiliza en la evaluación un interrogador comercial (Agilent N4385A), verificándose las prestaciones del dispositivo en resolución, efecto de altas temperaturas y aceite caliente. Para el estudio del dispositivo se han desarrollado dos ensayos que simulan, con relativa exactitud, el comportamiento de las dos bobinas que se utilizarían en un transformador convencional.

**Palabras clave:** Sensor Raman distribuido, sensor distribuido de temperatura, sensor de fibra óptica

### ABSTRACT:

An evaluation of the OTDR Raman technique in multimode optical fibre for monitoring the distribution of temperature in transformers is presented. The final objective is the study of the generation of hot points inside the transformer as possible causes in the generation of partial discharges responsible of their deterioration and blaze. A commercial device is used in this evaluation (Agilent N4385A), verifying their performances as resolution, the effect of high temperatures and hot oil. For the study of the device two test apparatus have been development for simulate, with comparative exactness, the behaviour of the two reels that would be used in a conventional transformer

**Key words:** Distributed Raman sensors, distributed temperature sensor, optical fibre sensor

## 1.- Introducción

La monitorización de parámetros físicos (temperatura, vibración,...) en transformado-

res eléctricos es difícil de realizar con instrumentación electrónica convencional, por los elevados niveles de ruido electromagnéti-

co que se producen en su interior. Por su inmunidad a este tipo de ruido, los sensores basados en fibra óptica pueden ser una herramienta útil en la monitorización de estos elementos.

El sensado en fibra óptica mediante scattering Raman permite medir la distribución de temperatura a lo largo de una fibra óptica de varios kilómetros de longitud con resoluciones de metros, proporcionando miles de puntos de medida desde un único extremo en pocos segundos.

En este trabajo se realiza una evaluación de la técnica Raman para la monitorización de la distribución de temperatura en el interior de un transformador de media tensión para estudiar las posibles causas de la generación de descargas parciales responsables del deterioro y incendio de éstos. Para ello se emplea un interrogador comercial (Agilent N4385A) y diferentes estructuras con un variado comportamiento térmico. En los ensayos realizados, verificamos el comportamiento y las prestaciones del dispositivo en cuanto a resolución, analizamos los problemas de pérdida de resolución asociada a las curvaturas, y los límites de uso de la fibra.

Para el estudio del dispositivo se han desarrollado dos ensayos que simulan, con relativa exactitud, el comportamiento de las dos bobinas que se utilizarían en un transformador convencional.

## 2.- Funcionamiento de los sensores Raman distribuidos en fibra

En el efecto no lineal de scattering Raman una onda incidente con suficiente energía  $\omega_p$  cede parte de ella al medio y en el intercambio se genera una onda de energía  $\omega_s$  de frecuencia menor. En este caso, a diferencia del scattering Brillouin, la energía transferida al medio produce fonones ópticos. Considerando, que en este proceso no intervienen ningún tipo de onda acústica (a diferencia con el scattering Brillouin), el scattering Raman estimulado es un proceso isotrópico y puede generarse en todas la direcciones.

Los dispositivos que usan el efecto Raman como sensor distribuido de temperatura funcionan de la siguiente manera: un pulso láser

de suficiente potencia se inyecta en la fibra que actúa como elemento sensor. En la fibra los fotones interaccionan con las moléculas de  $\text{SiO}_2$  produciéndose el backscatter lineal más dos señales de backscatter Raman provocadas por la interacción no lineal de la señal de bombeo con la molécula de  $\text{SiO}_2$ . La señal de backscatter Raman tiene dos componentes: la señal Stokes y la señal Anti-Stokes (Fig. 1). Las señales Stokes y Anti-Stokes están separadas de la señal de bombeo 13 THz para la molécula de  $\text{SiO}_2$  que compone la fibra. La intensidad de la componente Stokes muestra muy poca dependencia con la temperatura, mientras que la intensidad de la componente Anti-Stokes muestra alta dependencia con la temperatura. La relación de cambio de las intensidades entre las componentes Stokes y Anti-Stokes es la manera habitual de detectar diferencias de temperatura [1][2][3] y ésta se expresa como:

$$\frac{I_a}{I_s} = \frac{(n_0 + n_k)^4}{(n_0 - n_k)^4} \exp\left(-\frac{hc n_k}{kT}\right) \quad (1)$$

donde:  $I_a$  es la intensidad de la componente Anti-Stokes,  $n_0$  es el número de onda,  $h$  es la constante de Planck,  $k$  es la constante de Boltzmann,  $I_s$  es la intensidad de la componente Stokes,  $n_k$  es el cambio en el número de onda de la luz,  $c$  es la velocidad de la luz en la fibra óptica y  $T$  es la temperatura absoluta

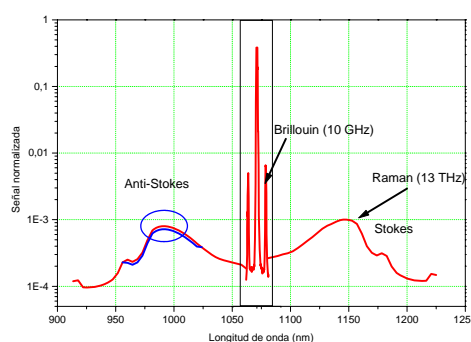


Fig. 1. Comparación teórica de las señales de backscatter lineal y de los scatters no lineales Brillouin y Raman

Los dispositivos sensores de fibra óptica distribuidos basados en el efecto Raman miden la distribución de temperatura mediante técnicas de reflectometría óptica tanto en el

dominio del tiempo (ROTDR) como en el dominio de la frecuencia (ROFDR) [1][3][4]. La resolución espacial de estos sensores es del orden de 1 m y la resolución en temperatura de 0.1 °C con rangos dinámicos en distancia de hasta 12 km [2][4][5].

### 3.- Funcionamiento de los sensores Raman distribuidos en fibra

El interrogador Agilent N4385A usa fibra multimodo gradiente de índice 50/125 como elemento sensor. Se han usado dos fibras diferentes con valores de atenuación de 0.7 dB/km a 1300 nm y 2.4 dB/km a 850 nm y una de ellas con primera protección de acrilato de 250  $\mu$ m, y la segunda con protección suplementaria plástica de 900  $\mu$ m. La atenuación medida para cada una de ellas a la longitud de onda de 1064 nm (longitud de onda de bombeo Raman del Agilent N4385A) es de 2,1 dB/km y 2,7 dB/km respectivamente.

#### 3.1.- Prueba de temperatura

Se han realizado pruebas de enfriamiento y calentamiento de la fibra entre temperaturas de -30°C y 300 °C, para conocer el comportamiento de ésta y sus protecciones. En el caso de bajas temperaturas el sistema mide de forma adecuada en comparación con un termómetro de resistencia de platino hasta temperaturas de -25 °C si bien a partir de estas temperaturas detecta errores producidos por el aumento de la atenuación de la fibra a temperaturas inferiores. En el calentamiento la protección plástica de 900  $\mu$ m a partir de 120 °C se deteriora. La protección de acrilato presenta un buen comportamiento hasta temperaturas de 200°C, a partir de 200 °C el acrilato cambia de color y el equipo refleja errores similares a los mostrados a temperaturas inferiores a -25°C.

#### 3.2.- Prueba de curvaturas

La técnica de medida se basa en la comparación entre las señales Stokes y AntiStokes en cada punto de la fibra, en este sentido las atenuaciones inducidas por curvaturas tienen una doble influencia: sobre la señal de bombeo atenuándola y atenuando las señales Stokes y Anti-Stokes (separadas en nuestro caso 26 GHz - 150 nm) e induciendo errores en la temperatura medida.

Se ha realizado un experimento en que se provocan un número de vueltas alrededor de diferentes curvaturas conocidas. Como resultado práctico y dentro de una resolución de  $\pm 0,5^\circ\text{C}$  el dispositivo es robusto hasta curvaturas de 2,5 cm de diámetro. Sin embargo la manipulación de la fibra óptica y el incremento del número de curvaturas deterioran la repetitividad de las medidas

#### 3.3.- Prueba de resolución

La resolución del dispositivo sensor depende de dos factores: por una parte la anchura del pulso óptico introducido en la fibra (en nuestro caso es el equivalente a 1,5 m o 15 ns) y de la resolución de muestreo de la electrónica (en nuestro caso 1 m).

#### 3.4.- Prueba de aceite

Se han colocado unos 10 metros de la fibra con protección de acrilato en aceite y se ha calentado hasta alcanzar 180°C. La medida de la temperatura en el proceso de cocido se muestra en la Fig. 2. La fibra queda teñida de color del aceite quemado, si bien no muestra problemas de transmisión de señal óptica.

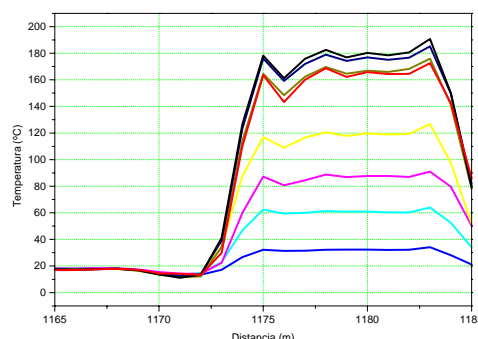


Fig. 2. Cambio de temperatura de la fibra en el calentamiento del aceite

### 4.- Simulador de transformador

#### 4.1.- Simulador del bobinado de alta

Para simular el bobinado del transformador de alta se ha usado un carrete de fibra óptica arrollada de idéntica manera. En lugar de hacer pruebas de calentamiento para no deteriorar la fibra se ha trabajado congelando la fibra a -30 °C y estudiando su comportamiento en su descongelación hasta temperatura ambiente (50°C de diferencia). La Fig. 3 muestra la distribución de temperatura a lo

largo del carrete de fibra en el proceso de enfriado para  $-17.5^{\circ}\text{C}$ . Se ha destacado la diferencia de temperaturas a lo largo del carrete para posición vertical ( $\Xi$ ) y horizontal (H) del mismo. El enfriamiento y el calentamiento del carrete no se producen de forma uniforme, calentándose o enfriándose más rápidamente la parte del carrete en contacto con las paredes del congelador. La distancia entre picos es de 140 m, distancia estimada en una capa de fibra bobinada.

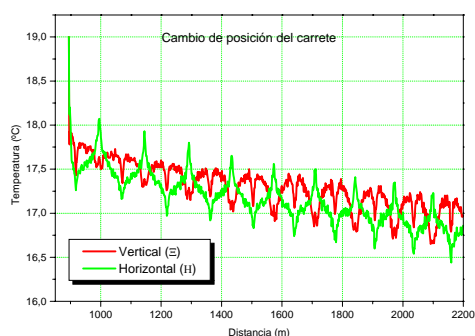


Fig. 3. Temperatura registrada en el carrete de fibra a  $-17,5^{\circ}\text{C}$  para el carrete en vertical y en horizontal.

A temperaturas inferiores a  $-25^{\circ}\text{C}$  el equipo de medida puede dar errores como se ha descrito en el estudio de la fibra sensora.

#### 4.2.- Simulador del bobinado de baja

Para simular el bobinado de baja tensión se ha utilizado 16 m de suelo radiante de 0,5 metros de ancho con un consumo de potencia eléctrica de 1630 vatios. Con él se puede simular hasta temperaturas de  $120^{\circ}\text{C}$ . Sobre este suelo se ha tejido una fibra con protección de 900 mm para posibilitar su trenzado y manipulación sin rupturas.

Después de probar con varios trenzados y disposiciones se ha encontrado como más eficiente el dibujado en la Fig. 4. En él se ha trenzado la fibra haciendo que ésta recorra longitudinalmente el simulador dos veces en el centro y otras dos veces más por cada uno de los extremos superior e inferior del simulador del bobinado.

En la Fig. 5 muestra las variaciones de temperatura esperadas en su interior para el arrollamiento puesto en horizontal y en vertical. En el caso último se tiene en cuenta el efecto chimenea que se produce.

La Fig. 6 muestra una fotografía del simulador realizado.

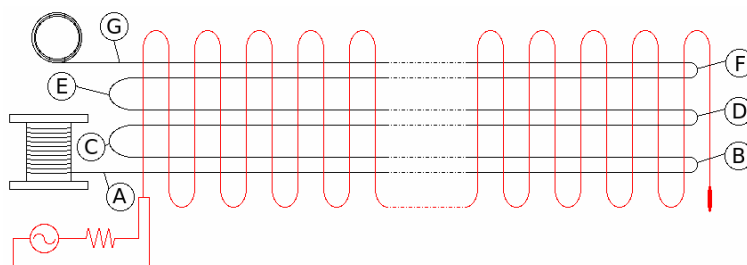


Fig. 4. Disposición de la fibra sobre el suelo radiante para simular el transformador de baja

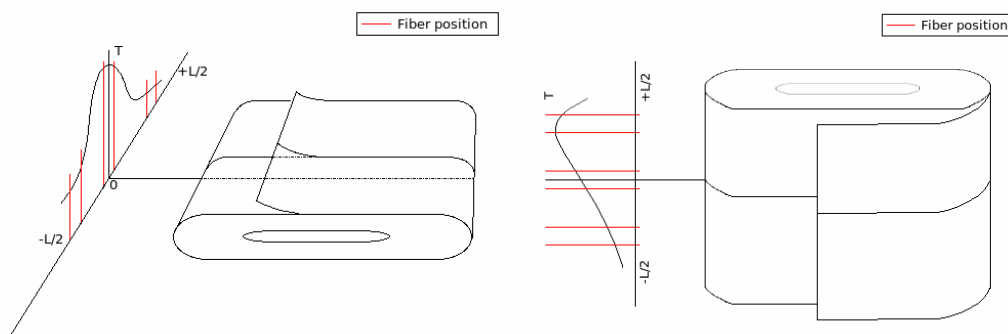


Fig. 5. Distribución esperada de temperaturas en el simulador realizado para posición horizontal y vertical



Fig. 6. Simulador de bobinado de baja

La Fig. 7 representa la variación de la temperatura a lo largo del simulador para la posición horizontal a diferentes potencias eléctricas de calentamiento. La temperatura medida sigue el modelo de distribución indicado en la Fig. 5 con bajadas de temperatura en los puntos extremos (A,B,C,D,E y F) indicados en la Fig. 4.

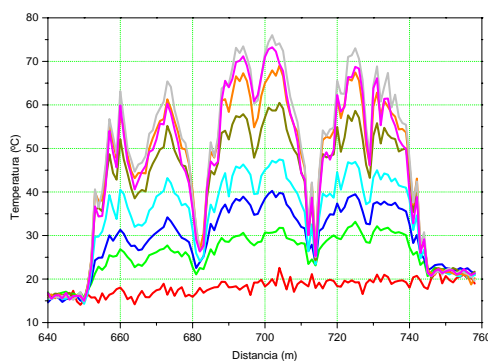


Fig. 7. Distribución de la temperatura en el proceso de calentamiento del simulador en posición horizontal

Para una potencia de calentamiento de 1000 W y una vez estabilizado el calentamiento del demostrador la diferencia de temperatura en él varía según se muestra en la Fig. 8. Estos resultados concuerdan con los valores esperados que para la posición horizontal y vertical del simulador.

Para comprobar las posibilidades de detectar los puntos calientes dentro del transformador generamos una perturbación con calentador de aire que hace que la temperatura de la fibra llegue a unos 80 °C, calentando sobre un punto del simulador situado a unos 6 m de uno de los extremos. Se ha medido la distribución de la temperatura a lo largo del simu-

lador y la distribución de temperatura en el simulador con este calentado con 1000W.

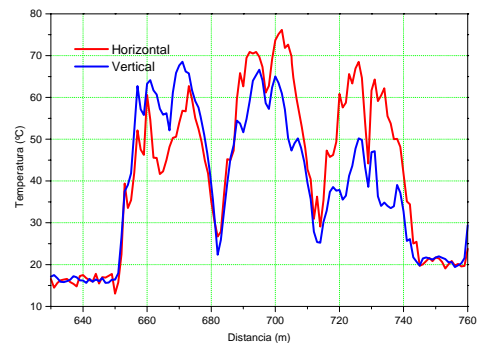


Fig. 8. Distribución de temperaturas a los largo del simulador 2 para este en posición horizontal y vertical.

La Fig. 9 muestra la distribución de temperaturas par el demostrador con perturbación y sin ella (gráfico superior) y la diferencia comparada con la distribución de temperaturas producida por el calentador de aire (figura inferior) con la en este caso, demostrándose que el dispositivo evalúa adecuadamente las los puntos calientes en el demostrador.

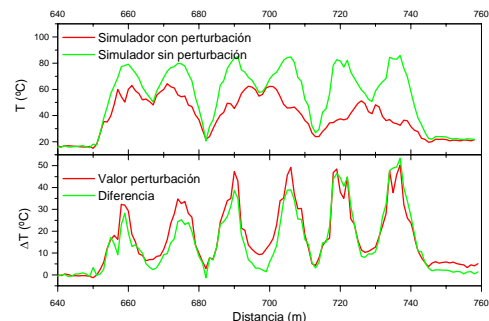


Fig. 9. Distribución de temperatura en el simulador 2 en vertical con la perturbación producida por el calentador

Finalmente se ha procedido a colocar una perturbación más puntual en una posición determinada del demostrador. La perturbación de realiza con el hilo calentador que se clienta por tensión a 80 °C. La Fig. 10 muestra la distribución de temperaturas par el demostrador con perturbación y sin ella (gráfico superior) y la diferencia comparada con la distribución de temperaturas producida por el alentador de aire (figura inferior) con la en este caso.



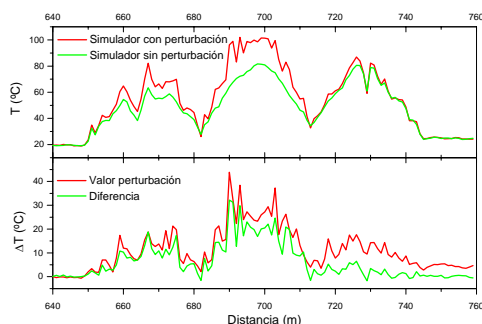


Fig. 10. Distribución de temperatura en el simulador 2 en vertical con la perturbación puntual

## 5.- Conclusiones

La medida de la distribución de temperatura en un transformador puede hacerse de forma efectiva usando la fibra como elemento sensor mediante un OTDR Raman. El equipo probado para este fin funciona con una fuente láser a 1064 nm y usa fibra multimodo 50/125  $\mu\text{m}$ . Se ha probado el comportamiento de estas fibras obteniéndose que la protección de 250  $\mu\text{m}$  de acrilato resiste hasta 200°C antes de cambiar de color, a partir de 280°C el acrilato se quema externamente sin dañar la sílice pero el conjunto se vuelve más frágil. Por el contrario la protección plástica de 900  $\mu\text{m}$  no resiste más de 120 °C.

La protección de 250  $\mu\text{m}$  puede calentarse hasta 180 °C en aceite sin que se observe cambio químico, aunque toma el color del aceite quemado.

Esta fibra de medida puede curvarse hasta 2,5 cm de diámetro sin una pérdida aparente de las propiedades de medida, si bien la manipulación de la fibra hace que la medida sea más ruidosa.

El equipo de medida comercial probado reporta valores equívocos para temperaturas inferiores a -30°C y por encima de 300°C.

Se ha simulado un transformador de alta usando un carrete de fibra que se ha enfriado a -30°C para analizar el efecto de cambio de temperatura. Para esta configuración de la fibra el dispositivo reporta buenas aproximaciones de la distribución de temperaturas.

Se ha simulado un transformador de baja usando suelo radiante. Se han probado varias configuraciones de disposición de la fibra sobre el demostrador para obtener el valor aproximado de la variación de temperatura en el transformador. Sobre el simulador probado el dispositivo de medida de la distribución de temperaturas determina de forma bastante aproximada la distribución de ésta y la localización de los puntos calientes.

**Agradecimientos:** A COTRADIS-ORMAZABAL y a la Fundación para el Fomento de la Innovación Industrial (FFII) y el proyecto “CRISALIDA” (CEN 2007-2009), financiado por el Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, Programa CENIT (Consortios Estratégicos Nacionales en Investigación Técnica), al MEC por los proyectos TEC2006-09990-C02-01 y TEC2006-09990-C02-02, el apoyo del Comunidad Autónoma de Madrid por los proyectos FUTURSEN S-0505/AMB/000374 y FACTOTEM S-0505/ESP/000417., y el apoyo del Fondo Social europeo por el programa I3P del CSIC, co-financiado por el Fondo Social Europeo.

## Referencias

- [1]. J. M. LÓPEZ-HIGUERA, “*Handbook of optical fibre sensing technology*”. John Wiley & Sons, LTD, 2002.
- [2]. D. INAUDI, “Photosensing technology in civil engineering applications”, *Handbook of Optical Fibre Sensing Technology*, Wiley & Sons, ch.25
- [3]. M. A. FARAHANI and T. GOGOLLA, “Spontaneous Raman scattering in optical fibers with modulated probe light for distributed temperature Raman Remote Sensing”, *J. Lightwave Technol.*, vol.17(8), pp.1379-1391, 1999
- [4]. J.P DAKIN, D.J. PRAYTT, G.W. BIBBY, J.N. ROSS, “Distributed optical fibre Raman temperature sensor using a semiconductor light source and detector”, *Electron. Letters*, vol.21(13), pp.569-570, 1985
- [5]. J. PARK, and Alt. “Raman-Based Distributed Temperature Sensor With Simplex Coding and Link Optimization”, *IEEE Photonics Technol. Letters*, vol.18(17), pp.1879-1881, 2006.